

УДК 620.92

## **ПРОМІЖНИЙ ПІРОЛІЗ ЯК ТЕХНОЛОГІЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА РІДКИХ МОТОРНИХ БІОПАЛИВ**

**Желєзна Т.А.<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, **Драгнєв С.В.<sup>2</sup>**, канд. техн. наук

<sup>1</sup>Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, провідний науковий співробітник, zhelyezna@secbiomass.com, <https://orcid.org/0000-0002-9607-3022>

<sup>2</sup>Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, старший науковий співробітник, dragnev@secbiomass.com, <https://orcid.org/0000-0003-3754-4186>

<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2025.10>

*Представлено етапи і перспективи розвитку технології проміжного піролізу біомаси. Проаналізовано і порівняно характеристики біонафти швидкого піролізу і проміжного піролізу біомаси. Розглянуто паливні властивості біонафти термокаталітичного риформінгу біомаси. Розроблено рекомендації для подальшого дослідження та розвитку технологій піролізу біомаси в Україні.*

*The stages and prospects for the development of intermediate pyrolysis of biomass are presented. The characteristics of bio-oil from fast pyrolysis and intermediate pyrolysis of biomass are analysed and compared. The fuel properties of bio-oil from thermo-catalytic reforming of biomass are considered. Recommendations for further research and development of biomass pyrolysis technologies in Ukraine are developed.*

Бібл. 25, табл. 3, рис. 2.

**Ключові слова:** біомаса, рідке біопаливо, біонафта, швидкий піроліз, проміжний піроліз, піропаливо.

ГТЗ – гідротермальне зрідження;  
ДВЗ – двигун внутрішнього згорання;  
ТЕО – техніко-економічне обґрунтування;  
ЦКШ – киплячий шар, що циркулює;  
мас. – масовий;  
FAME – метилові естри жирних кислот;

HDO – гідродезоксигенація;  
HHV – вища теплота згорання;  
HVO – гідроочищена рослинна олія;  
SVO – пряма рослинна олія;  
TCR – термокаталітичний риформінг.

**Актуальність** роботи обумовлена необхідністю заміщення викопних моторних палив альтернативними низьковуглецевими. Такими можуть бути певні види біопалива, зокрема піропаливо проміжного піролізу біомаси. Біонафта проміжного піролізу має якість, достатню для безпосереднього використання у двигунах, а підвищення її якості розширює діапазон застосування як моторного палива. **Метою** роботи є розробка рекомендацій для розвитку технологій піролізу біомаси в Україні. **Методи дослідження** включають проведення розрахунків, вивчення та аналіз літературних, статистичних та інших даних.

### **Біонафта швидкого піролізу біомаси та її характеристики**

Піроліз є технологією термохімічної конверсії сировини за відсутності кисню або повітря. Трьома продуктами піролізу біомаси є деревне вугілля, рідкі фракції і піролізний газ. Відносний обсяг кожного з

продуктів залежить від виду біомаси, температури процесу та часу перебування піролізних парів і твердої речовини у зоні реакції. Основними напрямками розвитку технології піролізу біомаси довгий час були повільний піроліз для отримання деревного вугілля і швидкий піроліз для максимізації виробництва рідкого продукту. При повільному піролізі за температури близько 400 °С і довгому часі перебування гарячів парів та твердої речовини вихід деревного вугілля складає до 35% по масі. При швидкому піролізі за температури 500 °С і короткому часі перебування гарячів парів (< 2 сек) та твердої речовини у зоні реакції вихід рідкого продукту може сягати 75% мас. Збільшення обсягу піролізної рідини (інші терміни – біонафта, піропаливо) досягається дуже високою швидкістю нагріву сировини (біомаси), яка зазвичай повинна бути мілко подрібненою (розмір часток < 3 мм) і мати вологість до 10% [1].

Швидкий піроліз може реалізовуватися у реакторах різної конструкції, наприклад, реактор з киплячим шаром, з ЦКШ, установка з двома реакторами киплячого шару, абляційний, реактор з піролізом у потоці. Одні конструкції, такі як реактор з киплячим шаром, з ЦКШ, обертовий конус (різновид абляційного реактора), вже досягли комерційного рівня, тоді як інші знаходяться на стадії дослідження і розвитку. Прикладом комерційного рівня технології є робота установок швидкого піролізу біомаси Empuro Hengelo Twence (Нідерланди), GFN Lieksa (Фінляндія), Pyrocel Gavle (Швеція). На установках виробляється біонафта в процесі абляційного піролізу у обертовому конусі, розробленому компанією BTG Bioliquids (Нідерланди) [2, 3].

Якість біонафти залежить від виду сировини і типу реактора, в якому реалізована технологія. Найбільший вплив на якість продукту має хімічний склад біомаси. У порівнянні з нафтопродуктами, біонафта швидкого піролізу характеризується низькою хімічною стабільністю, невеликою теплотворною здатністю (ННВ 14...20 МДж/кг), значним вмістом води (> 25% мас.), високими в'язкістю і кислотністю (табл. 1) [4-6]. В цілому це визначає її доволі посередні паливні властивості. Міжнародний стандарт ASTM D7544 визначає характеристики біонафти категорій G і D для можливості її використання у спеціально обладнаних промислових пальниках (категорія G) або комерційних/промислових пальниках (піропаливо категорії D з нижчим вмістом твердих часток і золи) [7]. Зокрема, вища теплота згорання біонафти має бути не нижче 15 МДж/кг, вміст води – не більше 30% мас., кінематична в'язкість при 40 °С – не вище 125 мм<sup>2</sup>/с, зольність – не більше 0,25% мас. (G) або 0,15% мас. (D). При цьому піропаливо категорії G не призначене для застосування у побутових або невеликих комерційних

Табл. 1. Характеристики біонафти швидкого піролізу різних видів біомаси [4-6]

Table 1. Characteristics of bio-oil from biomass fast pyrolysis [4-6]

Характеристики	Види біомаси			Нафта (для порівняння)
	Лушпайка рису	Стебла кукурудзи	Деревина	
Температура піролізу, °С	450...600	450...480	450...600	–
Вища теплотворна здатність, МДж/кг	9,5...17,4	13,9...22,3	14,0...21,9	40,0
Вміст води, % мас.	25...34	27	16...26	0,1
Зольність, % мас.	0,29	0,26	0,12	0,1
Густина, кг/м <sup>3</sup>	1113...1210	1150...1170	1200...1240	< 980
Кінематична в'язкість (40 °С), мм <sup>2</sup> /с	82...97	41,4	41...77	20...200 (80°С)
Кислотність, рН	2,6...3,4	2,2...3,2	2,3...3,2	–
Температура спалаху, °С			62...95	< 130

котлах, двигунах, а також на морському транспорті, а біонафта категорії D може застосовуватися тільки якщо зазначене обладнання спеціально модифіковане під таке паливо.

Для використання біонафти як моторного палива необхідне суттєве покращення її властивостей, для чого застосовують фізичні, хімічні та фізико-хімічні методи. Підвищення якості можна досягти за допомогою традиційних технологій, таких як етерифікація, гідрогенізація, паровий риформінг, емульгування та крекінг, а також нових технологій, таких як вакуумна та молекулярна дистиляція, екстракція за допомогою надкритичної рідини та мембранна сепарація [8-10].

#### **Проміжний піроліз як альтернатива швидкому піролізу при виробництві рідких біопалив**

Проміжний піроліз відрізняється від швидкого піролізу швидкістю нагріву сировини, яка є значно нижчою, в діапазоні 1...10 °С/с (при швидкому піролізі– 10...200 °С/с) [11]. Це призводить до меншого утворення смол, оскільки замість термічного крекінгу біополімеру відбуваються більш контрольовані хімічні реакції. Проміжний піроліз проходить за помірних температур (400...500 °С), а час перебування піролізних парів вимірюється секундами. На відміну від повільного і швидкого піролізу, проміжний піроліз націлений не на отримання максимального виходу певного продукту, а на виробництво якісних продуктів, готових до безпосереднього використання, наприклад, у двигунах внутрішнього згорання [12, 13].

Виділяють три етапи розвитку технології проміжного піролізу: (1) реактор Haloclean, (2) технологія Pyroformer і (3) технологія термokatалітичного риформінгу TCR. Піролізний реактор Haloclean (обертова піч) був розроблений в кінці 1990-х років у науково-дослідницькому центрі м. Карлсруе (Forschungszentrum Karlsruhe,

Німеччина). Вихідною метою розробки процесу піролізу була переробка електронного брухту із відокремленням галогенів для отримання палива та повторного використання металу. У 2000 р. технологію було успішно адаптовано під піроліз біомаси, у тому числі лігноцелюлозної; визначено, що для піролізу гранул з соломи оптимальною температурою процесу є 400 °С. Недоліком реактору Haloclean вважається його робота при атмосферному тиску, що обмежує якість отриманих продуктів і сферу їх подальшого використання. Хоча отримана піролізна рідина має значно нижчий вміст смол і в'язкість порівняно з біонафтою швидкого піролізу, вона не придатна до довготривалого використання у ДВЗ.

Технологія Pyroformer розроблена Європейським інститутом біоенергетичних досліджень (EBRI, Об'єднане Королівство). Першу пілотну установку споруджено у 2009 р., наступну (вдосконаленої конструкції) – у 2013 р. Горизонтальний реактор Pyroformer має подвійний коаксіальний шнек, який обертається і рухає суміш свіжої сировини і рециркульованої частини деревного вугілля (рис. 1). Проміжний піроліз відбувається за температури 350...450 °С і тиску до 1 МПа. Внутрішня рециркуляція гарячого деревного вугілля і його тривалий контакт з піролізними парами забезпечують досягнення кращої якості кінцевих продуктів. Таким чином, деревне вугілля, багата на вуглець пориста речовина, фактично відіграє роль каталізатора.

Технологія Pyroformer відпрацьована на різних

видах біомаси, таких як лушпайка рису, деревина, солома, оливкові кісточки та ін. Типовий вихід продуктів проміжного піролізу: газ – 20...25% мас., біонафта – 40...50% мас., деревне вугілля – 20...30% мас. При додаванні каталізатору вихід піролізного газу може збільшитися до 39% мас. [14, 15]. Порівняно з біонафтою швидкого піролізу, рідкий продукт технології Pyroformer має менший вміст води, меншу в'язкість і більш високу теплотворну здатність (табл. 2) [16]. Експериментальні дослідження підтвердили можливість використання суміші біонафти Pyroformer (20%) з біодизелем (80%) у багатоциліндрових двигунах із непрямым уприскуванням і запалюванням від стиснення [17].

Технологію термокatalітичного риформінгу TCR, яка вважається третім поколінням проміжного піролізу, розроблено в Інституті екології, безпеки та енергетичних технологій (Fraunhofer UMSICHT, Німеччина). Технологія TCR була досліджена на лабораторній установці потужністю 2 кг/год (по сировині) та відпрацьована на пілотній установці 30 кг/год (2014 р.), а з 2016 р. працює демонстраційна установка 300 кг/год. Суттєвою інновацією TCR порівняно з Pyroformer є інтегрований у загальний процес етап каталітичного риформінгу піролізних парів. Це дає можливість отримувати кінцеві продукти більш високої якості [12]. Реактор TCR складається з двох послідовно розташованих частин (рис. 2). У першій (горизонтальній) відбувається проміжний піроліз біомаси за температури 400...450 °С і швидкості

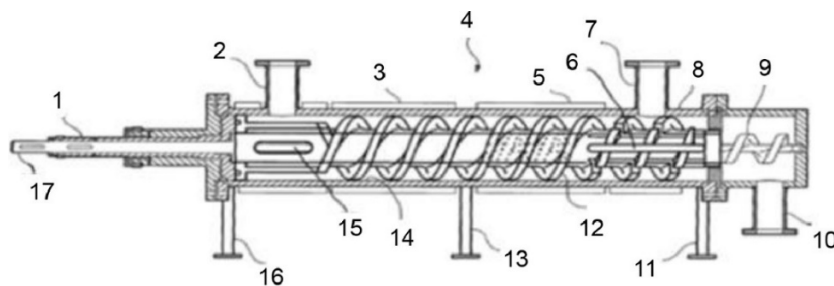


Рис. 1. Реактор Pyroformer [15], де:

1 – вал зовнішнього шнеку, 2 – патрубок для подачі сировини, 3, 4, 5 і 8 – електронагрівальні стрічки, 6 – шліць зовнішнього шнеку, 7 – газовідвідна труба, 9 – внутрішній шнек, 10 – патрубок для відведення твердої речовини, 11, 13 і 16 – опори, 12 і 14 – зовнішній шнек, 15 – шліць зовнішнього шнеку, 17 – вал внутрішнього шнеку

Fig. 1. Pyroformer reactor [15], where:

1 – external screw shaft, 2 – feed inlet pipe, 3, 4, 5 і 8 – electrical heating bands, 6 – external screw slot, 7 – gas outlet pipe, 9 – internal screw, 10 – solid drop out pipe, 11, 13 і 16 – supports, 12 і 14 – external screw, 15 – external screw slot, 17 – internal screw shaft

Табл. 2. Характеристики сировини та продуктів проміжного піролізу технології Pyroformer [16]

Table 2. Characteristics of feedstock and products of Pyroformer intermediate pyrolysis [16]

Показники	Сировина	
	Деревина	Солома ячменя
<b>СИРОВИНА</b>		
Елементний аналіз, % мас.:		
C	47,5	44,2
H	5,3	6,1
N	0,4	0,4
O (розраховано по різниці)	36,4	30,4
S	< 0,1	0,6
Cl	< 0,1	0,4
Леткі речовини, % мас.	82,1	74,9
Вологість, % мас.	7,0	11,9
Зв'язаний вуглець, % мас.	7,7	7,2
Зольність, % мас.	3,2	6,0
Вища теплотворна здатність, МДж/кг	18,2	17,0
<b>ПРОЛІЗНА НАФТА</b>		
Елементний аналіз, % мас.:		
C	55,69	62,57
H	7,93	8,12
N	0,36	1,41
O (розраховано по різниці)	36,02	25,79
Кислотне число TAN, мг КОН/г	47,5	30,9
Вологість, % мас.	15,4	5,8
Вища теплотворна здатність, МДж/кг	24,2	28,9
Кінематична в'язкість (40 °C), мм <sup>2</sup> /с	14,8	30,5
Густина (20 °C), г/мл	1,10	1,15
Коксовий залишок, % мас.	3,55	6,50
Зольність, % мас.	0,18	0,20
<b>ПРОЛІЗНИЙ ГАЗ</b>		
Склад, %:		
Водень H <sub>2</sub>	2,24	1,54
Кисень O <sub>2</sub>	–	0,42
Азот N <sub>2</sub>	5,54	4,68
Монооксид вуглецю CO	34,7	21,74
Метан CH <sub>4</sub>	7,24	10,48
Діоксид вуглецю CO <sub>2</sub>	50,27	60,13
Вища теплотворна здатність, МДж/м <sup>3</sup>	7,27	6,92
<b>ДЕРЕВНЕ ВУГІЛЛЯ</b>		
Елементний аналіз, % мас.:		

С	75,6	74,83
Н	3,38	3,51
Н	0,22	0,10
О (розраховано по різниці)	10,20	8,46
Зольність, % мас.	10,60	13,10
Вища теплотворна здатність, МДж/кг	30,1	32,9

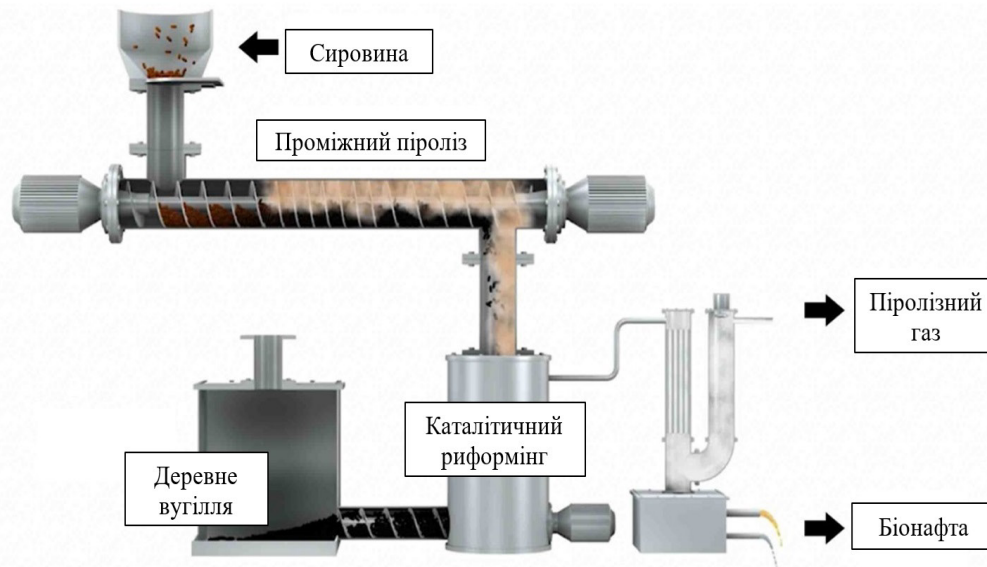


Рис. 2. Реактор TCR [19]

Fig. 2. TCR reactor [19]

нагріву сировини 1...10 °С/с. Сировина пересувається по горизонтальній частині реактору шнеком і попадає до другої (вертикальної) частини установки, де проходить каталітичний риформінг за температури 500...700 °С. В процесі реакції з утвореним деревним вугіллям піролізні пари трансформуються у багатий на водень синтетичний газ і суміш біонафти з водою у газовій фазі. Оптимізовані умови процесу в різних зонах реактора запобігають утворенню смол та інших забруднюючих речовин. Вихід окремих продуктів залежить від хімічних властивостей сировини, а якість і характеристики продуктів майже не залежать від властивостей вихідної біомаси. Типовий вихід піропалива по масі становить 9...12%, піролізного газу – 20...40%, деревного вугілля – 30...40%, води процесу – 20...30%. Орієнтовний енергетичний баланс продуктів наступний: біонафта і деревне вугілля – по 35%, піролізний газ – 25% [14, 18, 19].

Піропаливо, отримане за технологією TCR, є термічно стабільним, що дає можливість піддавати його дистиляції. В свою чергу, це є базою для за-

стосування інших термохімічних технологій для підвищення якості рідкого продукту, наприклад, гідроочищення. Піропаливо TCR характеризується низьким співвідношенням кисню до вуглецю О/С – 0,09, тоді як для рідкого продукту інших технологій проміжного піролізу (Haloclean, Pyroformer) це показник складає 0,29...0,31. Крім того, біонафту TCR можна безпосередньо змішувати з дизельним паливом і біодизелем, а також легко інтегрувати у технологічні процеси нафтопереробних заводів.

Якість біонафти TCR може бути покращена за допомогою гідрозедоксигенації (HDO). У порівнянні з необробленою піролізною рідиною, біонафта HDO має помітно вищу теплоту згорання (42,3 МДж/кг), що є співставним з теплотворною здатністю бензину і дизельного палива. Крім того, біонафта підвищеної якості характеризується малим вмістом сірки (101 мг/кг), значно нижчою в'язкістю і практично нульовим кислотним числом (табл. 3). Загалом вважається, що за своїми властивостями біонафта HDO схожа на суміш бензину, керосину і дизельного палива.

Підвищення якості біонафти TCR через технологію гідродезоксигенації було досліджено і відпрацьовано на демонстраційній установці потужністю 500 кг/год по сировині (підсушений осад стічних вод). Роботи було виконано в рамках міжнародного проекту TO-SYN-FUEL програми ЄС Горизонт 2020 (2017-2022 рр.). Основним результатом реалізації проекту є робоча демонстраційна установка TCR, що виробляє біонафту підвищеної якості, яка за своїми характеристиками відповідає суміші стандартизованих дизельного палива і бензину [20]. Дані експериментальних досліджень свідчать про можливість різних варіантів застосування необробленої і покращеної біонафти TCR у ДВЗ [12].

**Перспективи розвитку технології проміжного піролізу**

Перспективним напрямком розвитку технології проміжного піролізу є виробництво рідких біопалив для водного транспорту. Це є актуальним питанням, оскільки в Євросоюзі приділяється велика увага декарбонізації транспорту, зокрема, використанню відновлюваних та низьковуглецевих палив в авіації і на морському транспорті [23]. Серед альтернативних палив для морського транспорту зазвичай розглядають скраплений природний газ, метанол, аміак, водень та деякі види біопалива, зокрема, пряму рослинну олію (SVO), біодизель (FAME), відновлюване дизельне паливо (HVO), зріджений біогаз. Всі види біопалива

мають особливості і певну нішу свого застосування. Наприклад, FAME, HVO і біопаливо ГТЗ найбільш підходять для заміщення суднового дизельного палива та морського газойлю, зріджений біогаз – для заміни скрапленого природного газу, SVO – для використання замість мазуту [24].

Розвиток і вдосконалення технології проміжного піролізу біомаси дає можливість підвищити рейтинг біонафти серед альтернативних водних палив і наблизити її до практичного застосування на судах. Зазначені завдання включено до виконання у проєкті SEAFAIRER (2024-2028 роки) програми ЄС «Горизонт Європа». У проєкті планується розвиток технології термokatалітичного риформінгу TCR і спорудження демонстраційної установки за вдосконаленою технологією проміжного піролізу (VINTER). Будуть досліджуватися паливні характеристики необробленого піропалива та біонафти підвищеної якості. Установка VINTER працюватиме на трьох видах біомаси – лушпинні соняшника, деревних відходах і вичавках агави. Передбачено 30-денне демонстраційне плавання морського судна на біонафті проміжного піролізу. Зі сторони України в проєкті SEAFAIRER беруть участь експерти Біоенергетичної асоціації України.

**Висновки та рекомендації для України**

Україна має значний сировинний та технічний потенціал для виробництва різних видів біопалив, у тому числі рідких моторних. Одним з можливих

Табл. 3. Порівняння характеристик біонафти TCR і біонафти швидкого піролізу біомаси [13]

Table 3. Characteristics of TCR bio-oil and bio-oil from biomass fast pyrolysis [13]

Показники	Необроблена біонафта TCR	Біонафта TCR підвищеної якості (HDO)	Біонафта швидкого піролізу деревини [5, 15, 21, 22]
Елементний аналіз, % мас.:			
C	77,6	86,2	54...58
H	8,0	13,0	5,5...7,0
N	4,6	< 0,1	0...0,2
S	0,6	101 мг/кг	0...0,05
O (розраховано по різниці)	7,0	< 0,8	35...45
Вміст води, % мас.	2,2	30 мг/кг	15...35
Зольність, % мас.	0,005	немає даних	0...0,2
Нижча теплота згорання, МДж/кг	34,0	42,3	13...18
Температура спалаху, °C	47,0	< -20	62...95
Густина (15 °C), кг/м <sup>3</sup>	1014,4	815,7	1200...1240
Кінематична в'язкість (40 °C), мм <sup>2</sup> /с	4,43	0,97	40...100
Кислотне число TAN, мг КОН/г	2,1	0,0	88...126

напрямок досліджень та розвитку є проміжний піроліз із використанням широкого спектру біомасової сировини. Проміжний піроліз біомаси у поєднанні з термокаталітичним риформінгом дає можливість отримати біонафту, придатну для використання у ДВЗ, принаймні у суміші з іншими видами рідких біопалив. Застосування технологій підвищення якості біонафти розширює потенційний діапазон її використання як моторного палива.

В Україні є певні теоретичні та практичні напрацювання із досліджень технологій піролізу біомаси. Зокрема, в Інституті технічної теплофізики НАН України розроблено і детально досліджено технологію швидкого піролізу біомаси в абляційному шнековому реакторі [25]. Дослідження проведено на деревній тирсі вологістю 4% з розміром часток 0,5...0,7 мм, 0,5...1,0 мм та 0,5...5 мм. В ході експериментів вироблено біонафту густиною 1110...1190 кг/м<sup>3</sup> з ННВ близько 14 МДж/кг. Максимально досягнутий вихід піропалива склав 49% мас. Виконані дослідження дозволили визначити оптимальні режимні параметри роботи пілотної піролізної установки. Отриманий досвід дає можливість, за необхідності, спроектувати установку проміжного піролізу з горизонтальним шнеком і доповнити її секцією термокаталітичного риформінгу. Такі роботи рекомендується виконувати в рамках вітчизняного чи міжнародного проєкту із фінансуванням і тривалістю, достатніми для спорудження лабораторної або пілотної установки та налагодження її стабільного функціонування. Альтернативою може бути продовження робіт із вдосконалення технології швидкого абляційного піролізу з метою збільшення виходу біонафти та покращення її паливних характеристик.

Для визначення пріоритетних напрямків розвитку технологій піролізу біомаси в Україні необхідно проаналізувати секторальні потреби у рідких біопаливах, виконати ТЕО і аналіз життєвого циклу різних технологій та кінцевих продуктів, а також взяти до уваги новітні напрацювання зарубіжних фахівців. Зокрема, результати виконання проєкту SEAFAIRER за участі вітчизняних експертів можуть вплинути на вибір технологій піролізу для розвитку і дослідження в Україні.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. *Bridgwater T.* Pyrolysis of biomass. Presentation at ETIP webinar 25.05.2020. [https://www.music-h2020.eu/about-music/webinars-on-bioenergy-technologies/ETIP-Bioenergy\\_Webinar-WG2\\_25-May-2020\\_Presentation-T-Bridgwater\\_Aston-University.pdf](https://www.music-h2020.eu/about-music/webinars-on-bioenergy-technologies/ETIP-Bioenergy_Webinar-WG2_25-May-2020_Presentation-T-Bridgwater_Aston-University.pdf)
2. *Álvarez-Chávez B.J., Godbout S., Le Roux É.* et al. Bio-oil yield and quality enhancement through fast pyrolysis and fractional condensation concepts // *Biofuel Research Journal.* – 2019, N 24, p. 1054-1064. DOI: 10.18331/BRJ2019.6.4.2
3. *Reuerman P., Vos J., Lammens T.* White Paper: Fast Pyrolysis Bio-oil (FPBO). Deliverable D6.1 Part 2 of MUSIC project, 2022. [https://www.music-h2020.eu/publications-reports/MUSIC\\_D6-1\\_WhitePaperPart2FastPyrolysisBio-Oil\\_FV.pdf](https://www.music-h2020.eu/publications-reports/MUSIC_D6-1_WhitePaperPart2FastPyrolysisBio-Oil_FV.pdf)
4. *Железна Т.А., Драгнев С.В.* Аналіз напрямків підвищення конкурентоспроможності рідких біопалив другого покоління // *Теплофізика та теплоенергетика.* – 2023, т. 45, № 3, с. 78-87. <https://doi.org/10.31472/tpe.3.2023.9>
5. *Prasertpong P.* et al. Characterization of Bio-oils from *Jatropha* Residues and Mixtures of Model Compounds // *Chiang Mai University Journal of Natural Sciences.* – 2017, v. 16 (2), p. 135-144. [https://www.researchgate.net/publication/314287475\\_Characterization\\_of\\_Bio-oils\\_from\\_Jatropha\\_Residues\\_and\\_Mixtures\\_of\\_Model\\_Compounds#fullTextFileContent](https://www.researchgate.net/publication/314287475_Characterization_of_Bio-oils_from_Jatropha_Residues_and_Mixtures_of_Model_Compounds#fullTextFileContent)
6. *Xiujuan G.* et al. Properties of Bio-oil from Fast Pyrolysis of Rice Husk // *Chinese Journal of Chemical Engineering.* – 2011, v. 19, N 1, p. 116-121. <https://cjche.cip.com.cn/EN/abstract/abstract1942.shtml>
7. *ASTM D7544-23.* Standard Specification for Pyrolysis Liquid Biofuel. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/115155/5a69c009fa7d49adb0c18b193134558e/ASTM-D7544-23.pdf>
8. *Panwar N.L., Paul A.S.* An overview of recent development in bio-oil upgrading and separation techniques // *Environmental Engineering Research.* – 2021, v. 26, N 5: 200382. <https://doi.org/10.4491/eer.2020.382>
9. *Yang H., Yao J., Chen G.* et al. Overview of upgrading of pyrolysis oil of biomass // *Energy Procedia.* – 2014, N 61, p. 1306-1309. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.1087>
10. *Lachos-Perez D., Martins-Vieira J.C., Missau J.* et al. Review on Biomass Pyrolysis with a Focus on Bio-Oil Upgrading Techniques // *Analytica.* – 2023, v. 4, N 2, p. 182-205. <https://doi.org/10.3390/analytica4020015>

11. Kazawadi D., Ntalikwa J., Kombe G. A Review of Intermediate Pyrolysis as a Technology of Biomass Conversion for Coproduction of Biooil and Adsorption Biochar // *Journal of Renewable Energy*. – 2021, v. 2021: 5533780. <https://doi.org/10.1155/2021/5533780>
12. Jäger N., Neumann J., Apfelbacher A. et al. Two decades of intermediate pyrolysis: a major step towards CHP applicable bio-oils. Paper for 25th Europ. Biomass Conf. and Exhibition, EUBCE 2017, Stockholm 12-15.06.17. [https://www.researchgate.net/publication/317822570\\_TWO\\_DECADES\\_OF\\_INTERMEDIATE\\_PYROLYSIS\\_A\\_MAJOR\\_STEP\\_TOWARDS\\_CHP\\_APPLICABLE\\_BIO-OILS](https://www.researchgate.net/publication/317822570_TWO_DECADES_OF_INTERMEDIATE_PYROLYSIS_A_MAJOR_STEP_TOWARDS_CHP_APPLICABLE_BIO-OILS)
13. Hornung A., Apfelbacher A., Neumann J. et al. Combined heat and power generation from solid biomass derived bioliquids and syngas by TCR® – upgrade of TCR-liquids by hydrodeoxygenation. Paper for 24th European Biomass Conference and Exhibition, EUBCE 2016, Amsterdam, 6-9 June 2016. [bit.ly/3ZgKyV5](http://bit.ly/3ZgKyV5)
14. Hornung A. Intermediate Pyrolysis as an Alternative to Fast Pyrolysis. In "BioEnergy IV: Innovations in Biomass Conversion for Heat, Power, Fuels and Chemicals". ECI Symposium Series, 2013. [https://dc.engconfintl.org/bioenergy\\_iv/2/](https://dc.engconfintl.org/bioenergy_iv/2/)
15. Hornung A., Jahangiri H., Ouadi M. et al. Thermo-Catalytic Reforming (TCR) – An important link between waste management and renewable fuels as part of the energy transition // *Application in Energy and Combustion Science*. – 2022, v. 12, 100088. <https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2022.100088>
16. Yang Y, Brammer J.G., Mahmood A.S.N., Hornung A. Intermediate pyrolysis of biomass energy pellets for producing sustainable liquid, gaseous and solid fuels // *Bioresource technology*. – 2014, N 169, p. 794–799. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.07.044>
17. Hossain A.K., Ouadi M., Siddiqui S.U. et al. Experimental investigation of performance, emission and combustion characteristics of an indirect injection multi-cylinder CI engine fuelled by blends of de-inking sludge pyrolysis oil with biodiesel // *Fuel*. – 2013, v. 105, p. 135–142. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.05.007
18. Daschner R., Onyishi H. Conversion of biogenic waste into high quality hydrocarbons: recent progress in development of TCR-technology. Newsletter. Direct Thermochemical Liquefaction, IEA Bioenergy, Task 34, PyNe 54, December 2023. <https://task34.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/3/2023/12/PyNe54-komplett.pdf>
19. Di Gruttola F., Jahangiri H., Sajdak M. et al. Thermo-catalytic reforming (TCR) of waste solid grade laminate // *Journal of Cleaner Production*. – 2023, v. 419, 138276. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138276>
20. *Turning sewage sludge into fuels and hydrogen*. TO-SYN-FUEL Project Final publication, 2022. <https://www.tosynfuel.eu/wp-content/uploads/2022/09/TO-SYN-FUEL-Final-Publication.pdf>
21. Oasmaa A., Elliott D.C., Müller S. Quality Control in Fast Pyrolysis Bio-Oil Production and Use // *Environmental Progress & Sustainable Energy*. – 2009, v. 28, N 3, p. 404-409. <https://doi.org/10.1002/ep.10382>
22. Kass M., Abdullah Z., Bidy M. et al. Understanding the Opportunities of Biofuels for Marine Shipping. Report by Oak Ridge National Laboratory, 2018. <https://info.ornl.gov/sites/publications/Files/pub120597.pdf>
23. Железна Т.А., Драгнев С.В. Роль рідких біопалив у декарбонізації транспортного сектору // *Теплофізика та теплоенергетика*. – 2024, т. 46, № 4, с. 82-90. <https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2024.9>
24. Драгнев С.В., Железна Т.А., Гайдай О.І. Перспективи використання альтернативних палив на водному транспорті // *Теплофізика та теплоенергетика*. – 2023, т. 45, № 1, с. 55-63. <https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2023.7>
25. Клименко В.М., Баштовий А.І., Зубенко В.І., Антощук Т.О. Дослідження швидкого піролізу біомаси в абляційному шнековому реакторі // *Промислова теплотехніка*. – 2016, т. 38, № 2, с. 48-55. <https://doi.org/10.31472/ihe.2.2016.06>  
aki-gotovi-do-eksportu-stanovit-80-mln-kub-m

## INTERMEDIATE PYROLYSIS AS A TECHNOLOGY TO PRODUCE MOTOR BIOFUELS

Zheliezna T.A.<sup>1</sup>, Drahnev S.V.<sup>2</sup>

*Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057*

<sup>1</sup>PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, [orcid.org/0000-0002-9607-3022](https://orcid.org/0000-0002-9607-3022), e-mail: [zheliezna@secbiomass.com](mailto:zheliezna@secbiomass.com)

<sup>2</sup>PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, [orcid.org/0000-0003-3754-4186](https://orcid.org/0000-0003-3754-4186), e-mail: [dragnev@secbiomass.com](mailto:dragnev@secbiomass.com)

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2025.10>

The aim of the work is to prepare recommendations for the development of biomass pyrolysis technologies for the production of motor biofuels in Ukraine. Some possible directions of the development may be fast pyrolysis and intermediate pyrolysis. They differ in the heating rate of feedstock and the residence time of pyrolysis vapours in the reactor. For the fast pyrolysis, the first indicator is considerably higher, and the second one is lower, than for the intermediate pyrolysis. Thus, in terms of process parameters, intermediate pyrolysis is in the middle between the fast and slow pyrolysis. The quality of fast pyrolysis bio-oil depends on the type of feedstock and the type of reactor, in which the technology is implemented. The chemical composition of biomass has the biggest impact on the quality of the product. Compared to petroleum products, fast pyrolysis bio-oil is characterized by low chemical stability, low calorific value, considerable water content, high viscosity and acidity. In general, this determines rather mediocre fuel properties of the bio-oil. A feature of intermediate pyrolysis of biomass is that it is not aimed at obtaining the maximum yield of a certain product, but at producing high-quality products ready for direct use, for example, in internal combustion engines. Chemical reactions in the process of intermediate pyrolysis are more controlled than during fast pyrolysis, which leads to less tar formation and makes it possible to obtain bio-oil of sufficiently high quality. There are distinguished three stages of the development of intermediate pyrolysis technology: the Haloclean reactor, the Pyroformer technology and the thermo-catalytic reforming technology TCR. A significant innovation of the TCR technology is that the stage of pyrolysis

vapours catalytic reforming is integrated into the overall process. This makes it possible to obtain higher quality final products. The yield of individual products depends on the chemical properties of the feedstock, and the quality and characteristics of the products are almost independent of the properties of the initial biomass. Pyrolysis fuel oil obtained using TCR technology is thermally stable, which makes it possible to subject it to distillation. In turn, this is the basis for the application of other thermochemical technologies, for example, hydrotreating, to improve the liquid product quality. Ukraine has considerable feedstock resources and technical potential for the production of various types of biofuels, including motor biofuels. One of the possible areas of research and development is intermediate pyrolysis using a wide range of biomass as feedstock. The intermediate pyrolysis of biomass in combination with thermo-catalytic reforming makes it possible to obtain bio-oil suitable for use in internal combustion engines, at least in a mixture with other types of biofuels. The application of technologies to improve the bio-oil quality expands the potential range of its use as a motor fuel. To determine the priority areas for the development of biomass pyrolysis technologies in Ukraine, it is necessary to analyse sectoral needs in biofuels, perform feasibility study and life cycle analysis of various technologies and end products as well as take into account fresh results of the relevant international studies.

References 25, tables 3, figures 2.

**Key words:** biomass, bio-fuel, biooil, fast pyrolysis, intermediate pyrolysis, pyrolysis fuel oil.

1. *Bridgwater T.* Pyrolysis of biomass. Presentation at ETIP webinar 25.05.2020.

[https://www.music-h2020.eu/about-music/webinars-on-bioenergy-technologies/ETIP-Bioenergy\\_Webinar-WG2\\_25-May-2020\\_Presentation-T-Bridgwater\\_Aston-University.pdf](https://www.music-h2020.eu/about-music/webinars-on-bioenergy-technologies/ETIP-Bioenergy_Webinar-WG2_25-May-2020_Presentation-T-Bridgwater_Aston-University.pdf)

2. *Álvarez-Chávez B.J., Godbout S., Le Roux É.* et al. Bio-oil yield and quality enhancement through fast pyrolysis and fractional condensation concepts // *Biofuel Research Journal*. – 2019, N 24, p. 1054-1064. DOI: 10.18331/BRJ2019.6.4.2

3. *Reumerman P., Vos J., Lammens T.* White Paper: Fast Pyrolysis Bio-oil (FPBO). Deliverable D6.1 Part 2 of MUSIC project, 2022. [https://www.music-h2020.eu/publications-reports/MUSIC\\_D6-1\\_WhitePaperPart2FastPyrolysisBio-Oil\\_FV.pdf](https://www.music-h2020.eu/publications-reports/MUSIC_D6-1_WhitePaperPart2FastPyrolysisBio-Oil_FV.pdf)

4. *Zheliezna T.A., Drahnev S.V.* Analiz napriamkiv pidvyshchennia konkurentospromozhnosti ridkykh biopalyv druhoho pokolinnia [Analysis of directions for increasing the competitiveness of second-generation liquid biofuels.]. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. – V. 45, № 3 (2023), P. 78-87. (Ukr.) <https://doi.org/10.31472/tpe.3.2023.9>

5. *Prasertpong P.* et al. Characterization of Bio-oils from Jatropha Residues and Mixtures of Model Compounds // Chiang Mai University Journal of Natural Sciences. – 2017, v. 16 (2), p. 135-144.  
[https://www.researchgate.net/publication/314287475\\_Characterization\\_of\\_Bio-oils\\_from\\_Jatropha\\_Residues\\_and\\_Mixtures\\_of\\_Model\\_Compounds#fullTextFileContent](https://www.researchgate.net/publication/314287475_Characterization_of_Bio-oils_from_Jatropha_Residues_and_Mixtures_of_Model_Compounds#fullTextFileContent)
6. *Xiujuan G.* et al. Properties of Bio-oil from Fast Pyrolysis of Rice Husk // Chinese Journal of Chemical Engineering. – 2011, v. 19, N 1, p. 116-121. <https://cjche.cip.com.cn/EN/abstract/abstract1942.shtml>
7. *ASTM D7544-23.* Standard Specification for Pyrolysis Liquid Biofuel. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/115155/5a69c009fa7d49adb0c18b193134558e/ASTM-D7544-23.pdf>
8. *Panwar N.L., Paul A.S.* An overview of recent development in bio-oil upgrading and separation techniques // Environmental Engineering Research. – 2021, v. 26, N 5: 200382. <https://doi.org/10.4491/eer.2020.382>
9. *Yang H., Yao J., Chen G.* et al. Overview of upgrading of pyrolysis oil of biomass // Energy Procedia. – 2014, N 61, p. 1306-1309. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.1087>
10. *Lachos-Perez D., Martins-Vieira J.C., Missau J.* et al. Review on Biomass Pyrolysis with a Focus on Bio-Oil Upgrading Techniques // Analytica. – 2023, v. 4, N 2, p. 182-205. <https://doi.org/10.3390/analytica4020015>
11. *Kazawadi D., Ntalikwa J., Kombe G.* A Review of Intermediate Pyrolysis as a Technology of Biomass Conversion for Coproduction of Biooil and Adsorption Biochar // Journal of Renewable Energy. – 2021, v. 2021: 5533780. <https://doi.org/10.1155/2021/5533780>
12. *Jäger N., Neumann J., Apfelbacher A.* et al. Two decades of intermediate pyrolysis: a major step towards CHP applicable bio-oils. Paper for 25th Europ Biomass Conf. and Exhibition, EUBCE 2017, Stockholm 12-15.06.17. [https://www.researchgate.net/publication/317822570\\_TWO\\_DECADES\\_OF\\_INTERMEDIATE\\_PYROLYSIS\\_A\\_MAJOR\\_STEP\\_TOWARDS\\_CHP\\_APPLICABLE\\_BIO-OILS](https://www.researchgate.net/publication/317822570_TWO_DECADES_OF_INTERMEDIATE_PYROLYSIS_A_MAJOR_STEP_TOWARDS_CHP_APPLICABLE_BIO-OILS)
13. *Hornung A., Apfelbacher A., Neumann J.* et al. Combined heat and power generation from solid biomass derived bioliquids and syngas by TCR® – upgrade of TCR-liquids by hydrodeoxygenation. Paper for 24th European Biomass Conference and Exhibition, EUBCE 2016, Amsterdam, 6-9 June 2016. [bit.ly/3ZgKyV5](http://bit.ly/3ZgKyV5)
14. *Hornung A.* Intermediate Pyrolysis as an Alternative to Fast Pyrolysis. In "BioEnergy IV: Innovations in Biomass Conversion for Heat, Power, Fuels and Chemicals". ECI Symposium Series, 2013. [https://dc.engconfintl.org/bioenergy\\_iv/2/](https://dc.engconfintl.org/bioenergy_iv/2/)
15. *Hornung A., Jahangiri H., Ouadi M.* et al. Thermo-Catalytic Reforming (TCR) – An important link between waste management and renewable fuels as part of the energy transition // Application in Energy and Combustion Science. – 2022, v. 12, 100088. <https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2022.100088>
16. *Yang Y, Brammer J.G., Mahmood A.S.N., Hornung A.* Intermediate pyrolysis of biomass energy pellets for producing sustainable liquid, gaseous and solid fuels // Bioresource technology. – 2014, N 169, p. 794–799. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.07.044>
17. *Hossain A.K., Ouadi M., Siddiqui S.U.* et al. Experimental investigation of performance, emission and combustion characteristics of an indirect injection multi-cylinder CI engine fuelled by blends of de-inking sludge pyrolysis oil with biodiesel // Fuel. – 2013, v. 105, p. 135–142. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.05.007
18. *Daschner R., Onyishi H.* Conversion of biogenic waste into high quality hydrocarbons: recent progress in development of TCR-technology. Newsletter. Direct Thermochemical Liquefaction, IEA Bioenergy, Task 34, PyNe 54, December 2023. <https://task34.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/3/2023/12/PyNe54-komplett.pdf>
19. *Di Gruttola F., Jahangiri H., Sajdak M.* et al. Thermo-catalytic reforming (TCR) of waste solid grade laminate // Journal of Cleaner Production. – 2023, v. 419, 138276. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138276>
20. *Turning sewage sludge into fuels and hydrogen.* TO-SYN-FUEL Project Final publication, 2022. <https://www.tosynfuel.eu/wp-content/uploads/2022/09/TO-SYN-FUEL-Final-Publication.pdf>
21. *Oasmaa A., Elliott D.C., Müller S.* Quality Control in Fast Pyrolysis Bio-Oil Production and Use // Environmental Progress & Sustainable Energy. – 2009, v. 28, N 3, p. 404-409. <https://doi.org/10.1002/ep.10382>
22. *Kass M., Abdullah Z., Biddy M.* et al. Understanding the Opportunities of Biofuels for Marine Shipping. Report by Oak Ridge National Laboratory, 2018. <https://info.ornl.gov/sites/publications/Files/pub120597.pdf>
23. *Zheliezna T.A., Drahniev S.V.* Rol ridkykh biopalyv u dekarbonizatsii transportnoho sektoru [Role of biofuels in transport sector decarbonization.]. Thermophysics and Thermal Power Engineering. – V. 46, № 4 (2024), P. 82-90. (Ukr.) <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.9>
24. *Drahniev S.V., Zheliezna T.A., Haidai O.I.* Perspektyvy vykorystannia alternatyvnykh palyv na vodnomu transporti [Prospect for the use of biofuels in waterborne transport.]. Thermophysics and Thermal Power Engineering. – V. 45, № 1 (2023), P. 55-63. (Ukr.) <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2023.7>
25. *Klimenko V.M., Bashtovyi A.I., Zubenko V.I., Antoshchuk T.O.* Doslidzhennia shvydkoho pirolizu biomasy v abliatsiinomu shnekovomu reaktori [Research of biomass fast pyrolysis in the ablative screw reactor.]. Industrial Heat Engineering. – V. 38, № 2 (2016), P. 48-55. (Ukr.) <https://doi.org/10.31472/ihe.2.2016.06>

Отримано 06.12.2025

Received 06.12.2025

Прийнято до друку 18.02.2025  
Accepted for publication 18.02.2025